

굳지 않은 콘크리트의 間隙通過舉動

The Behavior of Fresh Concrete to Pass between Bars

오 상 균*

Oh, Sang-Gyun

Abstract

The ability to pass between bars is one of the most important performance of self-compacting concrete or high-flowability concrete since it determines the final filling capacity which influences the strength and durability of hardened concrete in structure. Therefore it has been evaluated by many researchers using different kinds of testing apparatuses. The assessments of passing ability, however, differ largely according to the style, the dimension and the criteria in apparatuses, and the value obtained from one apparatus cannot be converted those of the others. There needs a rheological approach to the better understanding of the passing behavior of fresh concrete between reinforcing bars, where the flow velocity of concrete becomes slow and the blockade sometimes occurs due to the interference between aggregates and reinforcing bars. Experimental works were conducted to clarify the effects of the clearance between reinforcing bars, the volume of aggregate and the rheological properties of matrix on the behavior from the rheological point view and showed the rational mix proportioning of concrete.

키워드 : 굳지 않은 콘크리트, 이상유체, 간극통과성, 레올로지 성질

Keywords : fresh concrete, two-phase fluid, passing ability, rheological properties

1. 서 론

고유동콘크리트는 부어넣기시 다짐작업을 필요로 하지 않고 자신의 높은 유동성만으로 철근 및 거푸집 사이를 통과하여 거푸집내 구석구석까지 충전할 수 있는 특징을 가지고 있다. 그 때문에 굳지 않은 콘크리트가 스스로 철근이나 거푸집 사이를 통과할 수 있는 능력(간극통과성)을 예측하는 것은 고유동콘크리트의 유동성 설계를 위해서 무엇보다도 중요한 과제라 할 수 있다.¹⁾²⁾ 고유동콘크리트의 유동성 및 충전성을 배합설계의 단계에서부터 예측할 수 있다면 펌프압송속도나 충전시간 등을 고려하여 콘크리트 공사를 보다 효율적 또한 합리적으로 할 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 고유동콘크리트는 굳지 않은 상태의 거동이 다른 콘크리트에 비해 복잡하고, 그것에 미치는 영향인자도 많다. 그러므로, 종래의 콘크리트와 같이 경험적인 품질평가 및 배합설계로는 굳지 않은 콘크리트의 유동상태를 해명하기에 상당한 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 굳지 않은 콘크리트의 철근간 통과거동을 레올로지에 입각하여 해석하고 실험을 통하여 정량화함으로써 고유동콘크리트의 유동설계를 위한 기초 자료를 얻고자 한다.

2. 이상유체(two-phase fluid)의 간극통과시의 거동

본 연구에서는 콘크리트가 철근 간을 통과할 때의 거동을 미시적인 관점에서 해석하기 위해 굳지 않은 콘크리트를 골재와 매트릭스로 이루어진 이상유체(two-phase fluid)로 보기로 한다. 이러한 가정하에 콘크리트의 간극통과시의 거동을 관찰해 보면 철근과 골재의 접근, 골재와 골재의 접근 등에 의해 골재와 매트릭스 사이에는 상대속도차가 발생하게 된다. 이와 같은 이상(two-phase)재료 간의 상대속도차는 간극통과시의 유동성상이 복잡하게 변화를 일으키게 하는 중요한 요인의 하나로 그것에 기인하는 골재와 매트릭스의 분리를 가져오며 속도차가 심할 경우 결과적으로는 철근간극부에 있어서의 폐색현상에 이르게 된다. 본 연구에서는 콘크리트를 이상유체로 가정할 경우의 거동을 이론적으로 해명하기 위하여 혼상유체의 역학관계에 의해 고찰하기로 한다. 혼상유체란 기상(氣相), 액상(液相), 고상(固相) 중에서 두 개 이상의 서로다른 상으로 이루어져, 서로가 영향을 미치면서 운동을 한다. 자연계나 일상생활에 있어서의 예로서는 공기중의 비눈, 오수, 끓는 물 등이 있다. 한편, 콘크리트는 유체(액상)과 입자(고상)를 두 개의 상으로 하는 혼상유체로 생각할 수 있다.

콘크리트가 통과하는 간극을 그림 1에 나타내는 것과 같이 단면적이 변화하는 노즐로써 생각하기로 하자. 그리

* 정회원, 동의대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사

고 노즐 내부를 입자(고상)와 기상으로 이루어진 이상유체(two-phase fluid)가 흐를 때, 이 유체의 흐름에 관한 기본적인 관계는 입자와 기체의 속도를 각각 q_1, q_2 , 단위 질량을 σ_1, σ_2 라고 하면 질량보존식, 운동방정식은 이하의 식과 같다.

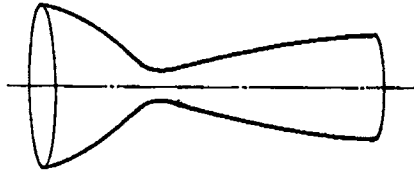


그림 1. 노즐

$$\sigma_1 q_1 A = \text{const}, \quad \sigma_2 q_2 A = \text{const} \quad (1)$$

$$q_2 \frac{dq_2}{dx} = \frac{1}{t_p} (q_1 - q_2) \quad (2)$$

$$\sigma_1 q_1 \frac{dq_1}{dx} = -\frac{dq_1}{dx} - \frac{\sigma_2}{t_q} (q_1 - q_2) \quad (3)$$

단,
$$t_q = \frac{2 \rho_2 a^2}{9 \eta_2}$$

여기서, q 는 유속, ρ 는 밀도, p 는 압력, a 는 입자의 반경, η_2 은 기체의 점성율을 표시한다. 또한, A 는 노즐의 단면적으로 축방향의 거리 x 에 대한 함수이다. t_q 가 무한대인 극한에서는 입자는 일정속도로 움직이며 기체만이 가속될 것으로 사료된다. 식(2)에서 노즐의 슬로트 부근에서는 부(負)의 큰 압력구배에 의해 기상이 가속되어진다. 여기서 입자의 운동방정식(2)가 나타내는 것과 같이 입자는 기체의 점성저항에 의해 끌려가지만 기상의 유속 보다는 늦어진다($q_1 < q_2$).

유한한 t_q 에 관해서 기상만일 때와 같은 순서로 입자의 질량보존식과 운동방정식으로부터 다음과 같은 미분방정식이 얻어진다.

$$\frac{1}{\sigma_2} \frac{d\sigma_2}{dx} = -\frac{1}{A} \frac{dA}{dx} - \frac{1}{q_2^2 t_p} (q_1 - q_2) \quad (4)$$

이 식으로부터 입자와 기상의 상대속도차가 증가하면 입자의 밀도도 증가하고 슬로트의 상류에서 최대치가 됨을 알 수 있다. 이상과 같이 노즐의 단면적이 감소하면 기상의 유속이 증가하여 고상(입자)은 기상으로부터 속도가 늦어진다. 또한 그러한 것에 의해 노즐의 스톱트 직선에서 고상의 밀도는 증가하여 최대치가 되는 것이다.

본 연구에서는 이와 같은 이상유체의 간극통과시 거동을 고찰을 한 후, 콘크리트를 골재와 매트릭스로 구성된

이상유체로 가정하여 간극통과부분에서의 유동상태를 파악하고자 한다. 단면적이 변하는 노즐 내부에서의 고체와 기체로 구성되어진 이상유체의 운동에 관한 이론식을 콘크리트에 적용시켜 생각해 보면 콘크리트가 단면적이 변하는 거푸집의 안쪽을 유동할 때의 거동을 이하와 같이 이론적으로 예측할 수 있다.

- 1) 철근간극 가까운 부근에서는 철근의 영향을 받아 매트릭스가 가속되어지며, 골재는 매트릭스의 점성저항에 기인한 연행력(골재연행성)에 의해 이끌려가지만 매트릭스의 속도 보다는 늦어져서 상대속도차가 발생한다.
- 2) 골재와 매트릭스의 상대속도차는 매트릭스의 점성, 철근간극에 의한 유동단면적의 변화, 골재의 용적(밀도) 등이 영향인자로 작용한다.
- 3) 골재와 매트릭스의 상대속도차가 증가하면 상대적으로 매트릭스 보다 골재가 많아져서 간극통과 직전의 골재밀도가 증가한다.

그림 2는 굵지 않은 콘크리트의 간극통과거동을 모델화 하여 나타낸 것이다. 굵지 않은 콘크리트가 유동하여 철근에 가까운 지점에서 철근간을 통과하기 전에는 그림의 아래에 나타내는 그래프와 같이 골재의 유동속도가 감소하여 골재와 매트릭스간의 속도차가 생기며 점성이 낮을수록 매트릭스가 먼저 통과하게 된다. 그러면 남아있는 골재에 나중에 흘러온 뒤쪽의 골재가 더해져서 이 구간에 있어서 콘크리트는 골재용적이 상대적으로 증가하게 된다. 이 때문에 콘크리트는 간극을 통과하기 어렵게 되는 것이다. 이러한 현상은 모델콘크리트를 이용한 간극통과거동의 가시화 실험결과에 의해서도 확인되었다.³⁴⁾

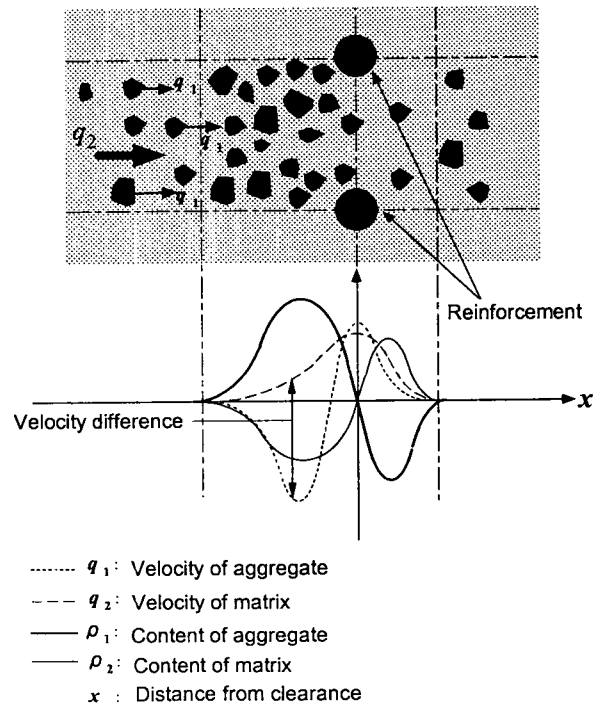


그림 2. 간극통과시 이상유체의 유동속도와 골재밀도

한편, 간극통과시 굳지 않은 콘크리트의 유동속도저하 및 부분적인 골재밀도의 변화는 콘크리트의 레올로지 성질이 겔보기상 변화한 것으로 해석할 경우(그림 3), 레올로지 정수의 증가를 의미한다.²⁾ 그러므로, 간극통과시의 콘크리트 레올로지 정수를 정량화하여 골재용적을 산출한다면, 굳지 않은 콘크리트의 간극통과거동을 레올로지적으로 설명할 수 있을 것으로 사료된다.

Passing through reinforcements

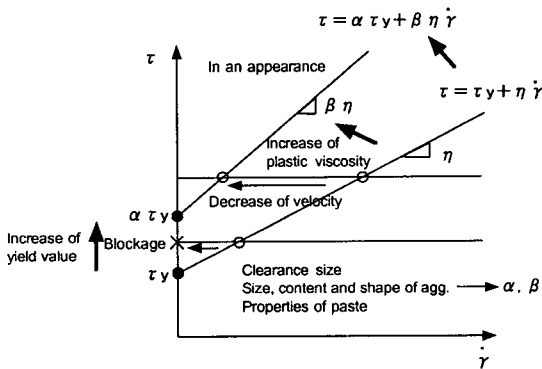
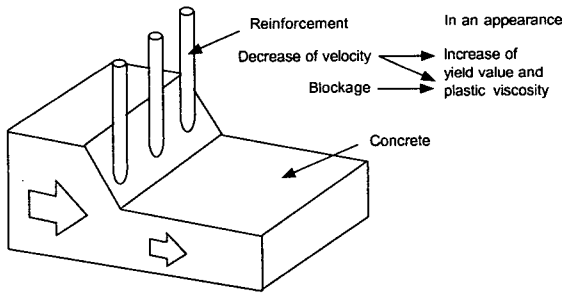
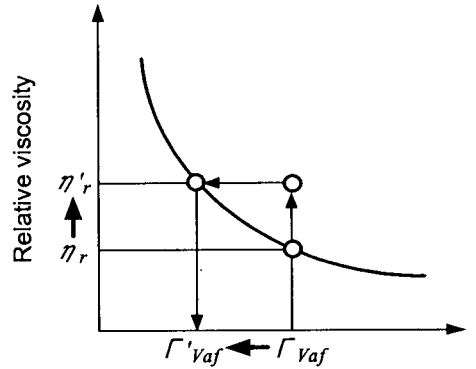


그림 3. 간극통과시 굳지 않은 콘크리트의 레올로지



Relative thickness of excess paste

그림 4. 잉여페이스트두께와 점도의 변화

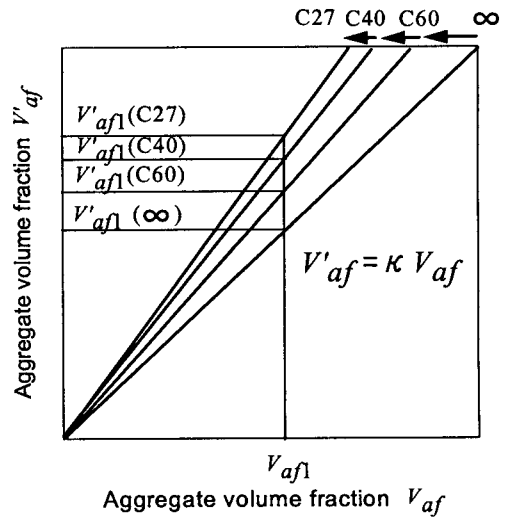


그림 5. 간극통과시 콘크리트 골재용적을 변화

3. 레올로지에 의한 콘크리트의 간극통과성 평가

굳지 않은 콘크리트가 철근을 통과할 때에 골재의 용적이 순간적으로 증가하므로 골재와 골재 사이의 거리는 좁아지고, 따라서 잉여페이스트두께⁵⁾⁻⁷⁾가 감소한다. 잉여페이스트두께와 레올로지 정수는 반비례하기 때문에, 콘크리트의 상대점도(콘크리트의 점도를 그 페이스트의 점도로 나눈 값)는 간극통과시에 증가한다. 이러한 관계에 입각해서 간극통과시의 잉여페이스트두께의 변화로부터 점도를 구할 수 있으며, 또 점도가 구해지면 일시적으로 증가되어진 골재의 용적도 도출할 수 있을 것이다(그림 4).

그림 5는 콘크리트가 간극을 통과할 때 일시적으로 일어나는 골재용적율의 변화를 나타낸다. 유동하는 굳지 않은 콘크리트가 장애물인 철근의 영향을 받기 전의 골재용적율을 V_{af} , 철근의 영향을 받아 증가된 골재용적율을 V'_{af} 라고 하면, V_{af} 와 V'_{af} 의 관계는 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

기울기 κ (골재용적변화율)는 철근이 없는 경우(철근간극이 무한대일 경우), 골재용적의 변화가 없이 1이 될 것이다. 간극이 있는 경우는 그 간격이 좁아질수록 골재용적변화율은 커진다. 한편, 그림에서 C60=60mm, C40=39.5mm, C27=27.2mm 의 간극을 나타낸다.

$$V'_{af} = \kappa V_{af} \quad (5)$$

또, 골재용적변화율은 그림 6과 같이 간극크기의 함수가 되며, 따라서 식(6)과 같은 형태가 됨을 예측할 수 있을 것으로 사료된다. 이때 철근의 직경 또한 콘크리트의 간극통과에 영향을 미치므로 이것을 고려하면 식(6)의 C_r 과 같이 상대간극비로 표현함으로써 그 영향을 고려할 수 있을 것으로 사료된다.

$$\kappa = a C_r^{-b} + 1 \quad (6)$$

$$C_r = \frac{l}{l+d}$$

여기서, C_r 은 상대간극비, l 은 간극크기(철근간 거리), d 는 철근직경을 가리킨다.

한편, 식(12)에 있어서 정수 a 와 b 는 페이스트의 레올로지 특성에 의해 변화할 것으로 예측되어진다. 그러므로, 페이스트의 레올로지 특성에 의해 정해지는 정수 a 와 b 를 실험을 통하여 구해 간극조건과 함께 식(12)에 대입함으로써 골재용적변화율을 구할 수 있을 것이다. 즉, 굳지 않은 콘크리트가 간극을 통과할 때에 증가되는 골재용적율을 산출하여 콘크리트의 유동거동을 예측할 수 있을 것이다.

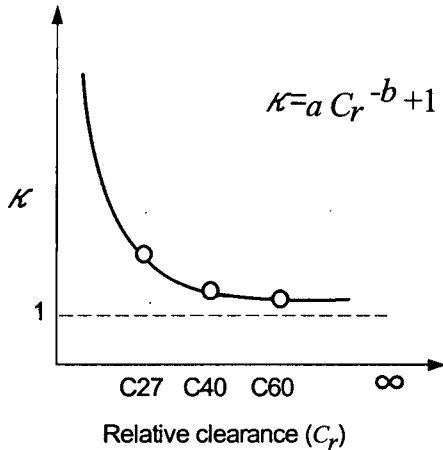


그림 6. 간극크기와 골재용적변화율의 관계

4. 실험개요

4.1 실험인자 및 수준

실험인자 및 수준은 표 1 및 표 2와 같다. 본 연구의 실험에서는 고흡수성 수지를 이용하여 제조한 모델 페이스트와 모델콘크리트를 이용하여 간극통과실험을 하였다. 모델 페이스트의 유동특성(플로우)은 3종류, 여기에 골재의 양을 조절하여 용적율을 5수준으로 하여 모델 콘크리트를 제조하였으며, 간극조건으로는 간극크기를 3수준, 간극통과속도를 4수준으로 하였다.

4.2 모델 페이스트 및 콘크리트의 배합

시료의 배합 및 플로우 시험 결과는 표 3 및 표 4과 같다. 모델은 고흡수성 수지로 제조한 모델 페이스트와 이것에 인공경량골재를 혼합한 모델 콘크리트를 이용하였다.⁹⁾ 고흡수성 수지는 물성의 경시변화가 없는 모델로서 간극통과시의 레올로지 특성변화를 고찰한 것이다.

표 1. 실험인자 및 수준

실험인자	수준	기호
모델 페이스트의 플로우 (cm)	25	P1
	30	P2
	35	P3
골재용적율	0.59	59
	0.56	56
	0.53	53
	0.50	50
	0.47	47
간극크기 (mm)	27.2	C27
	39.5	C40
	60.0	C60
간극통과속도 (cm/sec)	0.5	
	1.0	
	1.5	
	2.0	

표 3. 모델의 배합 및 플로우 시험 결과

시료	기호	고흡수성 수지(g/l)	단위수량(kg/m ³)		플로우 (cm)
			잔골재	굵은골재	
모델 페이스트	P1	4.7			28.0
	P2	4.5			30.0
	P3	4.1			35.8
모델 콘크리트	P1-53	4.7	451	350	
	P1-50	4.7	425	330	
	P1-47	4.7	400	310	
	P2-56	4.5	476	370	
	P2-53	4.5	451	350	
	P2-50	4.5	425	330	
	P3-59	4.1	502	389	
	P3-56	4.1	476	370	
	P3-53	4.1	451	350	

4.3 실험 방법 및 측정항목

본 연구에서는 그림 7의 저자가 개발한 박스형 간극통과성 시험장치를 사용하였다. 시험방법은 용기 속에 시료를 적당량 넣고 용기 저면으로부터 박스형 철근간극을 끌어올려 콘크리트가 간극을 통과하는 상황을 상대적으로 단순화한 형태로 재현한 것이다. 박스를 바꾸어 철근간극을 조절하고 철근간극을 끌어올리는 속도는 컨트롤 박스와 변속기를 사용하여 변화시킨다. 그리고, 시험장치 전면에 디지털 카메라를 설치하고 녹화한 자료를 화상처리하여 시간당 이동거리를 구하여 간극이동속도(유동속도)를 산출하였다. 철근에 걸리는 하중은 박스를 메단 와이어 중간에 로드 셀을 설치하여 측정할 수 있다. 로드 셀은 인장형과 회전형을 조합하여 구성하였다.

실험의 측정항목으로 모델페이스트는 플로우, 레올로지 정수, 모델콘크리트는 슬럼프플로우, 유동속도, 철근에 걸리는 하중 등이다. 모델콘크리트의 경우, 유동속도와 하중으로부터 간극통과시에 예상되는 결보기상 증가한 점도를 산출할 수가 있다.⁹⁾

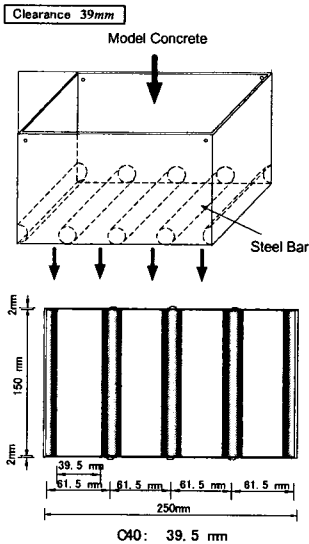
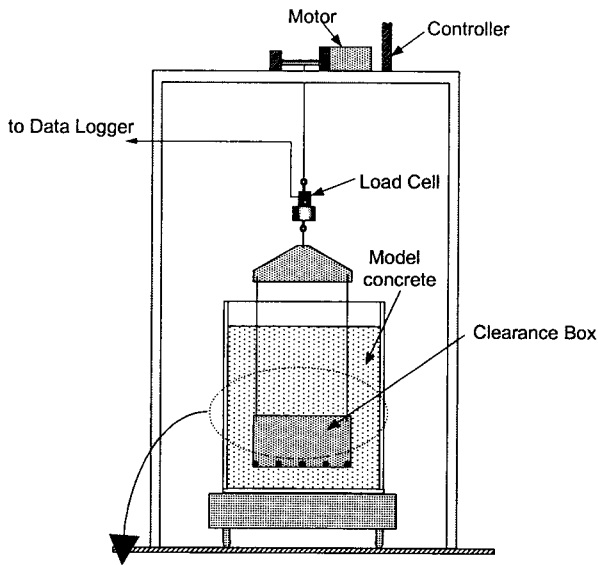


그림 7. 박스형 간극통과시험장치

5. 실험결과 및 고찰

그림 8은 모델콘크리트의 간극통과시험에 의해 얻어진 값을 상대잉여페이스트 두께와 상대점도로 환산하여 플로트한 결과를 나타낸다. 실험결과, 앞절에서 예상했던 것과 같이 이상유체인 모델콘크리트는 좁은 간극을 통과할 때에

일시적으로 점성이 증가하였으며, 그 정도는 간극의 크기가 작아질수록 커지며 골재의 양이 많을수록, 즉 잉여페이스트두께가 좁을수록 큰 경향을 보였다. 한편, 그림에서 실선은 잉여페이스트두께와 점도와의 관계를 실험을 통하여 구한 기존의 실험식을 나타낸다.

한편, 간극통과시에 증가한 상대점도로부터 상대잉여페이스트두께를 구하여 골재용적율을 산출한 것이 그림 9이다. 그림에서 가로축은 간극에서 멀어 영향을 받지 않거나 간극이 존재하지 않을 때의 골재용적, 즉 배합시의

골재용적율을 나타내며, 세로축은 간극에 가까워져 간극의 영향을 받아 페이스트와 속도차를 일으키고 페이스트가 먼저 빠져나감으로써 골재가 일시적으로 증가한 용적율을 나타낸다. 실험결과들을 직선회귀하여 전체적으로 고찰해 보면 앞 절의 그림 5에서 예측했던 것과 같은 경향을 나타냄을 알 수 있다.

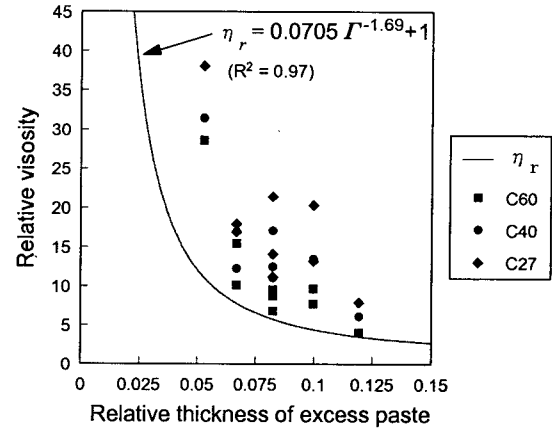


그림 8. 간극통과시 모델콘크리트의 점성변화

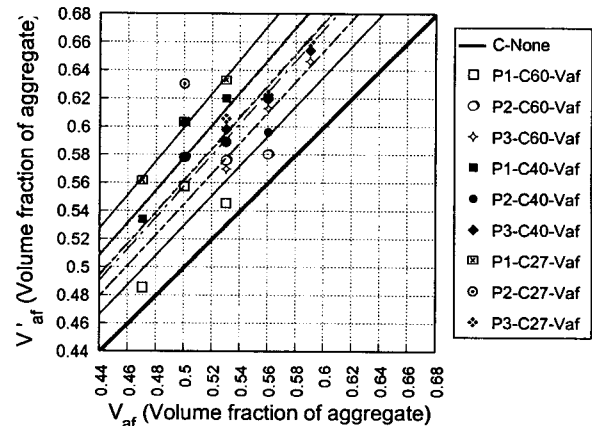


그림 9. 간극통과시 모델콘크리트 골재용적의 변화

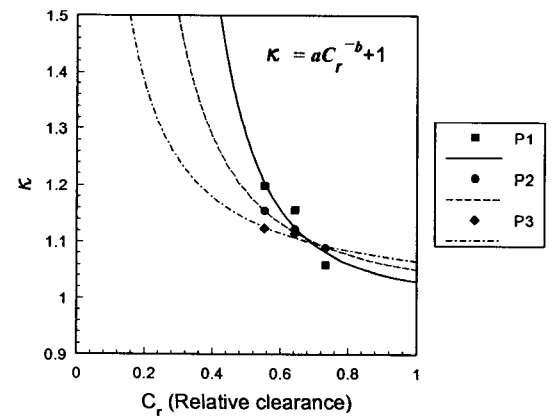


그림 10. 상대간극비와 골재용적변화율의 관계

그림 10은 레올로지 특성이 다른 3종류의 페이스트에 있어서 상대간극비와 골재용적변화율 κ 의 관계를 나타낸다. 실험에서 얻은 결과를 식(6), 그림 6과 같은 형태를 기초로 회귀하여 그림과 같은 결과를 얻었으며, 이러한 결과는 앞 절의 예상에 잘 부합된다고 볼 수 있다.

여기서, 식(6)의 실험정수 a 와 b 는 페이스트의 소성점도의 함수이므로, 그림 11과 같이 회귀할 수 있다. 따라서, 실험정수의 산출식인 식(7)과 식(8)을 얻을 수 있다.

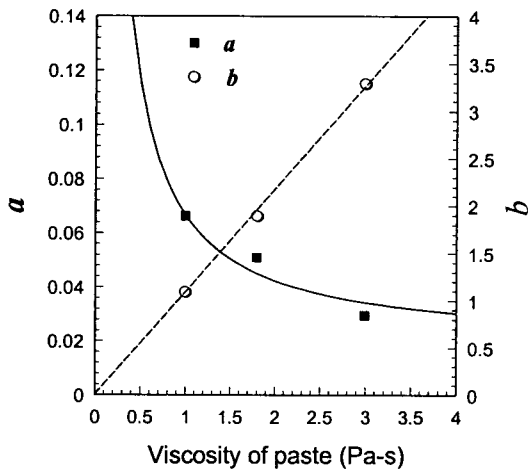


그림 11. 페이스트 점도와 정수 a , b 의 관계

$$a = 0.0483 \eta_p^{-1.01} + 0.0184 \quad (7)$$

$$b = 1.09 \eta_p \quad (8)$$

한편, 위 식으로부터 산출되어진 모델콘크리트의 간극 통과시 증가된 점도(계산치)와 실험결과로부터 얻은 점도(실험치)는 그림 12와 같다. 그림에서 모델콘크리트 점도의 계산치는 본 연구의 범위 내에서 실험치와 전체적으로 높은 상관관계에 있음을 확인할 수 있었으며, 따라서 본 연구에서 콘크리트를 이상유체로 가정하여 해석한 식들은 신뢰성이 높다고 판단되어진다.

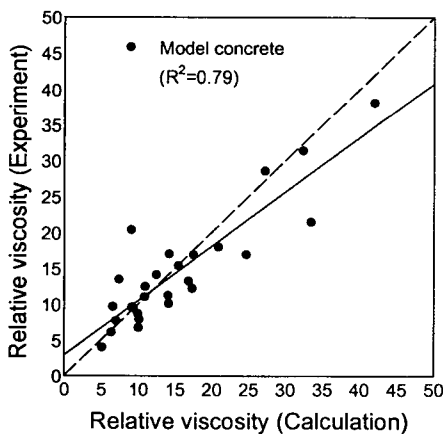


그림 12. 점도의 계산치와 실험치 비교

6. 결론

본 연구에서는 굳지 않은 콘크리트를 이상유체로 가정하고 철근간극통과시의 거동에 관해 모델을 이용한 실험을 통하여 레올로지적으로 고찰하였다. 콘크리트의 간극 통과시 유동속도저하와 이에 따른 점성변화는 골재의 용적율이 일시적으로 변화한 것으로 해석할 수 있으며 이 골재용적변화는 간극조건 등을 고려한 상대간극비를 고려하여 정량화하였다. 따라서, 콘크리트의 간극통과거동을 레올로지에 입각하여 정량화된 식으로 유동속도의 변화를 예측할 수 있을 것이다.

금후의 과제로는 모델콘크리트가 아닌 실제의 콘크리트를 이용하여 본 연구에서 얻은 결론을 확인해 볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 寺西浩司 外 4人, "링그貫入試驗による高流動콘크리트の間隙通過性評價", 第2回超流動콘크리트に関するシンポジウム論文報告集, pp.1-8, 1994. 5
2. 野口貴文 外 2人, "高流動콘크리트の間隙通過性に関するレオロジー的考察", 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.23-28, 1995
3. 小澤一雅 外 1人, "自己充填콘크리트の配合設計法の現状と課題", 土木學會論文集 No.496, V-24, pp.1-8, 1994. 8
4. 吳相均 外 2人, "可視化モデルによる高流動콘크리트の間隙通過性に関する考察", 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.37-42, 1997
5. C. T. Kennedy, "The Design of Concrete Mixes", Proceedings of American Concrete Institute, Vol.36, p.373, 1940
6. T. C. Powers, "Properties of Fresh Concrete", John Wiley & Sons Inc., 1968
7. C. F. Ferraris and J. M. Gaidis, "Connection between the Rheology of Concrete and Rheology of Cement Paste", ACI Material Journal, pp.388-393, Jul-Aug 1992
8. 橋本親典 外 2人, "フレッシュ콘크리트の管内流動における閉塞課程の可視化に関する實驗手法", 콘크리트工學, Vol.26, No.2, pp.119-127, 1988
9. 吳相均 外 2人, "圓柱を用いた高流動콘크리트のレオロジー定數算定方法", 日本建築學會構造系論文集, No.518, pp.1-8, 1999. 4
10. S. G. Oh, T. Noguchi and F. Tomosawa, "Toward Mix Design for Rheology of Self-compacting Concrete", International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, pp.361-372, 1999. 9
11. 森博嗣 外 3人, "フレッシュ콘크리트の間隙通過挙動に関する可視化モデル實驗", 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.569-574, 1995